

УДК 556.33:550.348

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ ДЛЯ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОАКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТКИ)

Г.Н. Копылова, С.В. Болдина

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия
gala@emsd.ru, boldina@emsd.ru

Уровнемерные наблюдения в скважинах традиционно рассматриваются в качестве одного из эффективных методов мониторинга сейсмоактивных регионов и поиска предвестников сильных землетрясений [2-6]. В результате многолетних наблюдений установлено, что в изменениях уровня могут проявляться разнообразные вариации под влиянием процессов подготовки и реализации землетрясений, а также других геодинамических процессов, сопровождающихся изменениями напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород. Диагностика *гидрогеосейсмических вариаций уровня воды* с определением их форм, амплитуд и продолжительностей является одной из главных задач при проведении специализированных наблюдений на сейсмопрогностических полигонах, потому что такие вариации являются единственными доступными для изучения проявлениями гидрогеодинамических процессов в системах «скважина – водовмещающая порода» под воздействием сейсмичности.

В [4] были определены актуальные научные задачи, направленные на повышение эффективности метода уровнемерных наблюдений:

- изучение закономерностей проявления в изменениях уровня воды гидрогеодинамических предвестников, ко- и постсейсмических эффектов, в зависимости от параметров землетрясений и локальных гидрогеологических условий;
- разработка методологии изучения гидрогеодинамических процессов в системах «скважина – водовмещающая порода» под влиянием сейсмичности и оценки деформометрических свойств скважин;
- оценка сейсмопрогностической информативности метода уровнемерных наблюдений.

Решение этих задач основывается на систематизации и обобщении данных многолетних уровнемерных наблюдений в сейсмоактивных регионах.

В таблице 1 отражены основные мероприятия по развитию наблюдательной сети и методики обработки данных уровнемерных наблюдений на Камчатке. На рисунке 1 Б приводится схема расположения шести скважин, в которых проводились уровнемерные наблюдения с дискретизацией 5-10 минут и были зарегистрированы различные типы гидрогеосейсмических вариаций уровня воды.

ИЗУЧЕНИЕ И ТИПИЗАЦИЯ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ

С использованием оригинальной методики обработки данных уровнемерных наблюдений были выделены вариации уровня в связи с сильными ($M \geq 5.0$) местными землетрясениями и сильнейшими ($M \geq 7.6$) землетрясениями на расстояниях до 800 – 9000 км. В [4] выполнена типизация гидрогеосейсмических вариаций и установлены общие закономерности их проявления. Показано, что в скважинах, вскрывающих на глубинах в первые сотни метров вулканогенно-осадочные и терригенные породы неогенового и мелового возраста, могут регистрироваться гидрогеодинамические предвестники, косейсмические скачки и постсейсмические вариации при местных землетрясениях, а также различные вариации уровня (колебания, повышения, понижения) при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильнейших удаленных землетрясений. При этом особенности таких сигналов определяются

техническими характеристиками скважин и локальными гидрогеологическими условиями, в первую очередь, составом порового флюида и водопрводящими свойствами водовмещающих пород. Установление определяющего значения в проявлении гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, технических особенностей отдельных скважин и локальных гидрогеологических условий выдвинуло в качестве первоочередной задачу изучения процессов их формирования на основе создания феноменологических моделей поведения систем «скважина – водовмещающая порода» при сейсмических воздействиях. Примеры разработки таких моделей приводятся в [1].

Таблица 1. Развитие сети и методики обработки данных урвнмерных наблюдений на Камчатке, 1987 - 2011 гг.

Дата	Содержание работ	Организация
1978-1993 гг.	Организация и проведение урвнмерных наблюдений с использованием поплавковых самописцев, периодичность представления данных 1 раз в сутки.	КОМСП
1996-1997 гг.	Организация цифровой регистрации уровня воды на скв. Е-1 и ЮЗ-5 (периодичность 10 мин) с использованием регистратора ГИП-3 и датчика уровня ДУ.	КЦМСиВА, ИФЗ
2001-2002 гг.	Модернизация системы урвнмерных наблюдений на скв. Е - 1 и ЮЗ - 5; установка регистраторов Кедр А2 и ультразвуковых датчиков уровня воды (ООО Полином, г. Хабаровск); периодичность регистрации 10 мин;	КЦМСиВА, ИФЗ КОМСП
	Организация цифровых урвнмерных наблюдений на сети скважин ОАО «Камчатгеология» (скв. 1303, 1306, 1309, 1311);	КГ
	Внедрение программных средств информационной системы POLYGON для сбора, хранения и обработки данных урвнмерных наблюдений.	КОМСП
2004 г.	Создание методики обработки данных урвнмерных наблюдений для выделения гидрогеосейсмических вариаций уровня воды.	КОМСП
	Организация цифровых урвнмерных наблюдений на скважинах ОАО «Камчатгеология» с периодичностью 10 мин.	КГ
2007-2011 гг.	Модернизация системы урвнмерных наблюдений.	КФ ГС РАН
	Использование регистраторов Кедр-Д, Кедр ДМ v2 (ООО «Полином», г. Хабаровск) и телеметрической передачи данных; периодичность регистрации 5 мин	КГ

Примечание: КОМСП – Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия (с 2004 г. – Камчатский филиал Геофизической службы РАН – КФ ГС РАН); КЦМСиВА – Камчатский центр мониторинга сейсмической и вулканической активности; ИФЗ – Институт физики Земли, г. Москва; КГ – ОАО «Камчатгеология».

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ «СКВАЖИНА – ВОДОВМЕЩАЮЩАЯ ПОРОДА»

Построение вышеназванных моделей, объясняющих гидрогеосейсмические вариации уровня воды, включает четыре основных этапа экспериментальных и аналитических мероприятий [1]. Первый этап – оценка фильтрационных и упругих параметров водовмещающих пород с использованием данных опытно-фильтрационных работ в скважине и результатов барометрического и приливного анализа вариаций уровня воды с определением величин его барометрической эффективности и приливной чувствительности в зависимости от частоты.

Второй этап – оценка параметров инерционности водообмена между скважиной и водовмещающими породами, включая моделирование отклика уровня воды на изменения порового давления в широком диапазоне частот и верификацию результатов моделирования по поведению амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды.

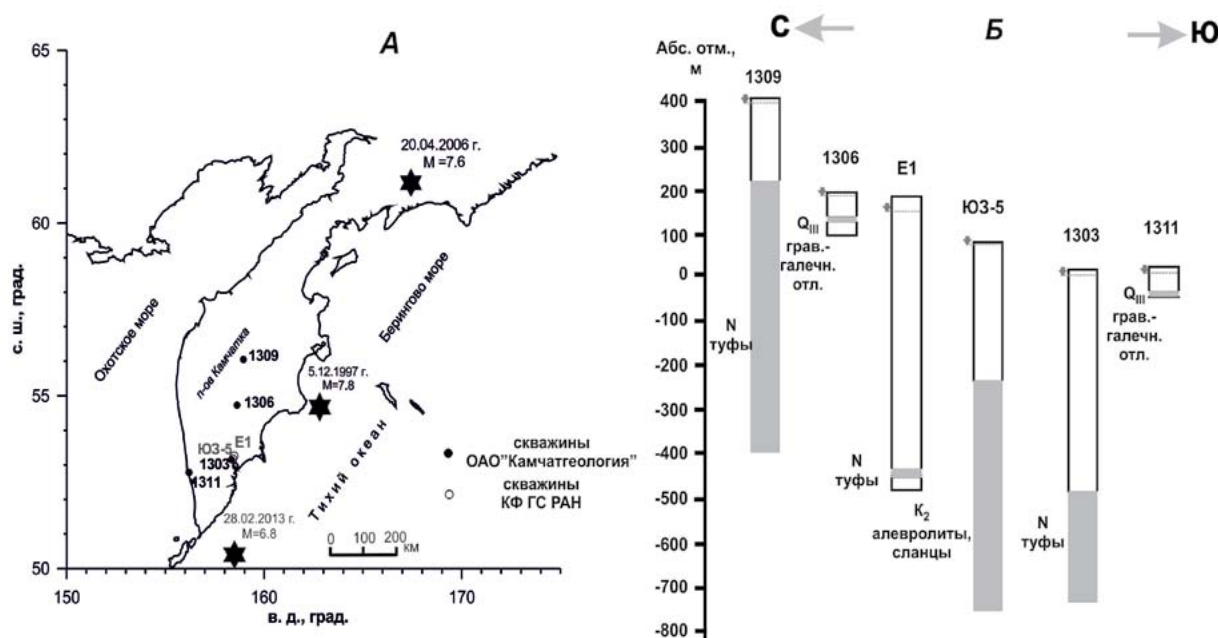


Рис. 1. Схемы расположения скважин (А) и их строение (Б): серым цветом выделены области связи стволов скважин с подземными водами; стрелки обозначают положение уровня воды в скважинах. Звездами показаны эпицентры землетрясений Кроноцкого 05.12.1997 г., Олюторского 20.04.2006 г. и землетрясения 28.02.2013 г.

Третий и четвертый этапы включают обоснование математических моделей для описания зарегистрированных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в рассматриваемой скважине, их моделирование и анализ результатов.

Основными результатами четвертого этапа и создания модели в целом являются выводы о характере гидрогеодинамических процессов, формирующих соответствующие типы гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, а также практические следствия для задач геофизического мониторинга и поиска предвестников землетрясений. К наиболее важным практическим результатам относится обоснование возможности получения количественных оценок или качественных заключений об изменениях напряженно-деформированного состояния геологической среды в районе скважины на стадиях подготовки и реализации сильных землетрясений.

ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ

Гидрогеодинамический предвестник в форме синхронного понижения уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 с амплитудами 1 и 11 см проявлялся в течение трех недель перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г., $M = 7.8$ (рис. 1 А) [4, 5]. Его проявление объясняется квазиупругой деформацией расширения водовмещающих пород при развитии предсейсмических движений в области очага Кроноцкого землетрясения, зафиксированных методом GPS-геодезии.

Аномальные изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и Е-1 были также обнаружены в апреле 2006 г. в период, предшествующий Олюторскому землетрясению 20.04.2004 г., $M = 7.6$ (рис. 1 А) [6]. Вместе с тем, однозначное утверждение о связи (или отсутствии такой связи) выявленных аномалий с процессом подготовки Олюторского землетрясения представляется преждевременным, в первую очередь, из-за большой удаленности области очага этого землетрясения (1030 км). Наиболее вероятной причиной таких изменений уровня в трех скважинах являются локальные изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород вследствие активизации геодинамических процессов на прилегающем участке Камчатской сейсмофокальной зоны. Предполагалось, что связь во времени между такой активизацией и подготовкой Олюторского землетрясения в Корякском нагорье может быть обусловлена планетарным процессом и требует проверки на большем фактическом материале.

В скв. Е-1 гидрогеодинамический предвестник в форме увеличения суточной скорости понижения уровня воды (рис. 2) проявляется примерно перед 70% землетрясений с $M \geq 5.0$ на расстояниях до 350 км [3, 4]. Сейсмопрогностическая эффективность этого вида предвестника составляет $I = 2 - 3$ [3, 4] и показывает, что его использование может улучшить прогнозирование сильных землетрясений в 2-3 раза, по сравнению со случайным угадыванием, с заблаговременностью в первые недели – месяцы. С 2002 г. по настоящее время с использованием этого вида предвестника осуществляется среднесрочная оценка возможности возникновения землетрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского с представлением прогнозных заключений в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности (КФ РЭС).

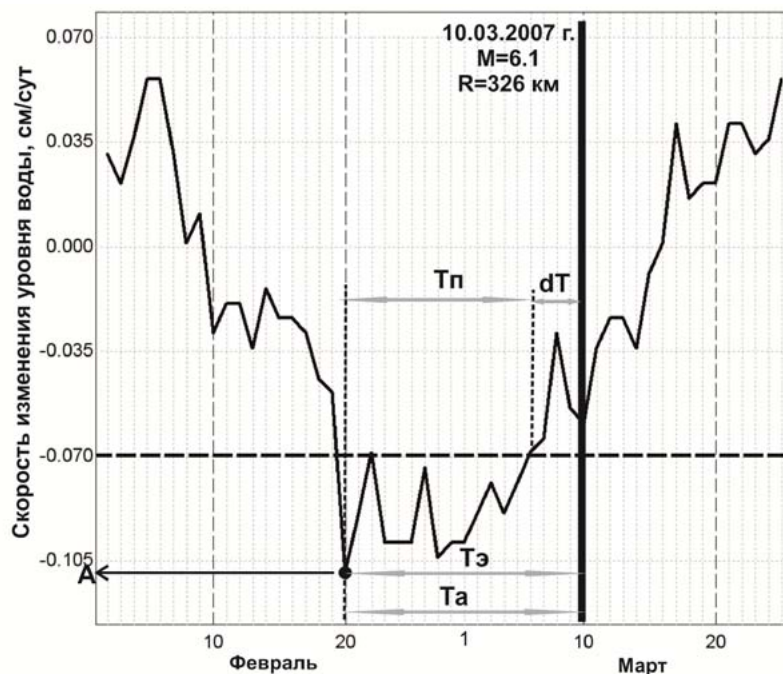


Рис. 2. Проявление предвестника в изменениях уровня воды в скв. Е-1 перед землетрясением 10.03.2007 г. и его параметры: T_p – продолжительность, T_a – заблаговременность, A – экстремальная амплитуда, $T_{э}$ – время от экстремальной амплитуды до землетрясения, dT – время от окончания предвестника до землетрясения. Горизонтальной пунктирной линией показано пороговое значение скорости понижения уровня воды -0.07 см/сут.

На рисунке 3 показаны изменения уровня воды в скважине Е-1 в период землетрясения 28.02.2013 г., $M = 6.8$ (рис. 1 А). Перед этим событием в течение 44 сут наблюдалось понижение уровня с повышенной скоростью, и было выдано заблаговременное уведомление КФ РЭС о возможности возникновения сильного землетрясения. Вероятность такого события оценивалась в 73% при величине эффективности предвестника $I = 2.2$.

После землетрясения уровень повысился с амплитудой 2 см. Такое изменение уровня воды является типичным в случаях проявления сильных ($M \geq 6.6$) местных землетрясений на расстояниях до 300 км [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты уронемерных наблюдений и пример успешного прогноза землетрясения 28 февраля 2013 г. показывают, что:

- используемая в КФ ГС РАН система специализированных наблюдений позволяет диагностировать различные типы гидрогеосейсмические вариации уровня воды, в т.ч. гидрогеодинамические предвестники сильных землетрясений, в режиме близком к реальному времени;

- предложенный ранее в [3, 4] метод вероятностного среднесрочного сейсмического прогноза времени сильных землетрясений на Камчатке с заблаговременностью месяцы – недели, основывающийся на данных равномерных наблюдений на скв. Е-1, продемонстрировал свою практическую полезность в системе прогнозирования сейсмической опасности в Камчатском крае.

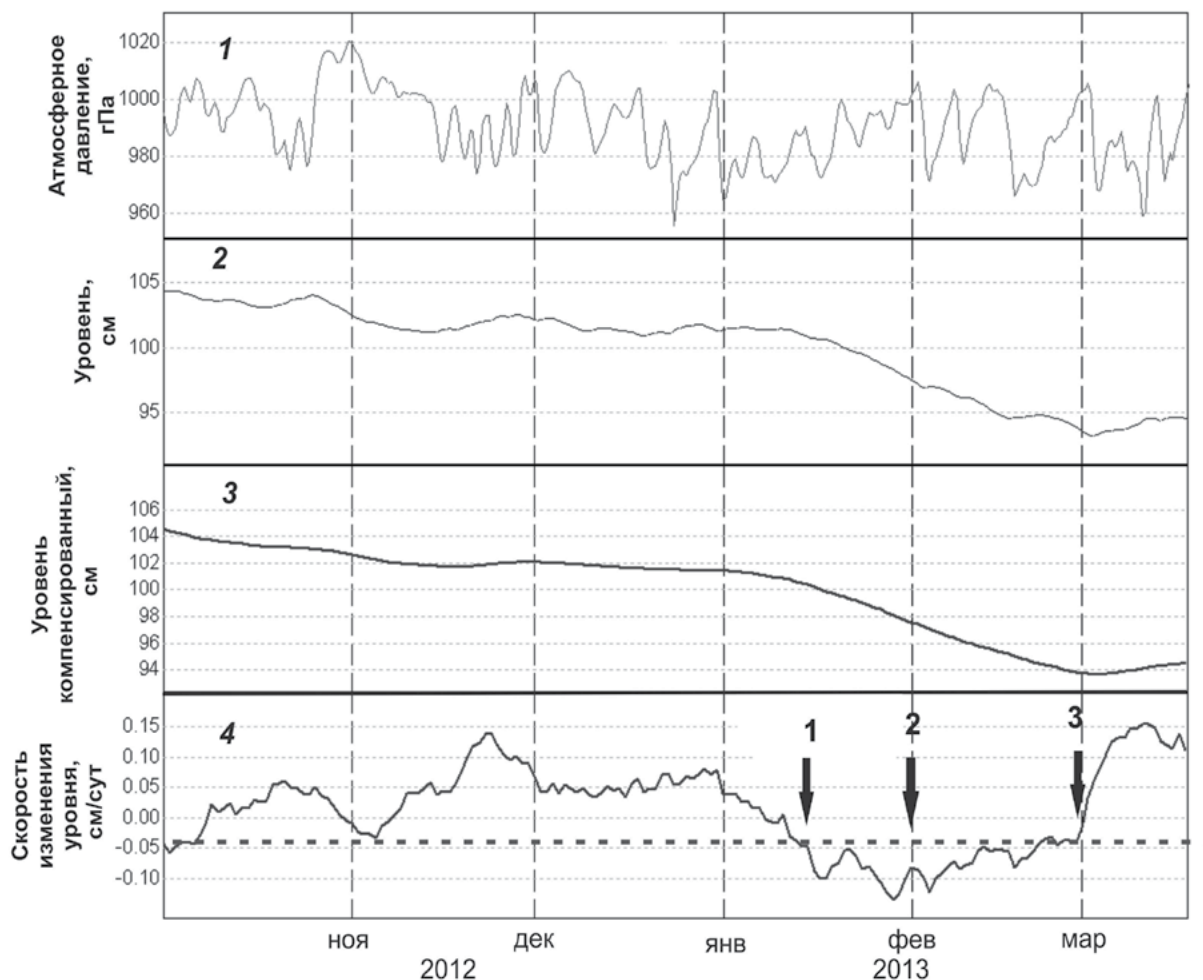


Рис. 3. Изменения уровня воды в скважине Е-1 с 1.09.2012 г. по 18.03.2013 г., включающие проявление гидрогеодинамического предвестника и постсейсмическое повышение в связи с землетрясением 28.02.2013 г.:

- 1 и 2 – данные 5-минутной регистрации атмосферного давления и уровня воды,
 3 – среднесуточные изменения уровня воды с компенсированными баровариациями,
 4 – суточная скорость изменения уровня с учетом скорости нисходящего тренда.

На графике 4 стрелками показаны: 1 – 16.01.2013 г., начало проявления гидрогеодинамического предвестника; 2 – 1.02.2014 г., дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС; 3 – 28.02.2013 г., дата землетрясения. Горизонтальная пунктирная линия – пороговое значение суточной скорости изменений уровня воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Моделирование гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважине // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: тр. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. Т. 1. С. 166-170.
2. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. №8. С. 58-69.

3. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987 - 1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39-52.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смолина Н.Н., Сизова Е.Г., Касимова В.А. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в пьезометрических скважинах Камчатки (по данным наблюдений 1987-2011 гг.) // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2012. С. 236-269.
5. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w = 7.8$ // Тихоокеанская геология. 2012. № 5. С. 104-114.
6. Копылова Г.Н., Смолина Н.Н. Изменения уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20.04.2006 г., $M_w = 7.6$ // Вулканология и сейсмология. 2010. №3. С. 36-49.